基于PLUS模型的黄河流域生态系统服务评价及多情景预测
——以陕西段为例

张 艳[1,2], 李骏南[1], 潘博华[3]

（1. 长安大学土地工程学院,陕西 西安 710054；2. 陕西省土地整治重点实验室,陕西 西安 710054；
3. 长春市规划编制研究中心,吉林 长春 130022）

摘 要： 生态系统服务长期供给与最大化是社会可持续发展的重要前提,应准确掌握生态系统服务变化趋势。基于多源数据,借助InVEST模型和生态系统服务评估体系构建等方法理论,综合分析了2000—2020年黄河流域陕西段各类型生态系统服务的时空演变特征,并利用PLUS模型对2035年其土地利用及生态系统服务变化情况进行模拟预测。结果表明:(1) 2000—2020年黄河流域陕西段综合生态系统服务值整体表现出“南高北低”的分布特征,各生态系统服务优势区域同样集中在研究区南部。(2) 2000—2020年研究区内综合生态系统服务值表现为先降后升,且提升明显,高值区域由南到北不断扩大;除土壤保持服务外,其余类型生态系统服务值在研究时段内均有一定提升,且各生态系统服务间具有明显的空间分异性。(3) 相较于自然发展情景,生态保护情景下林地面积提升显著,研究区中北部服务等级提升明显;建设优先情景下建设用地面积大幅增长,沿黄水系服务等级降低区域聚集明显;可持续发展情景下林地和建设用地均有扩张,研究区北部服务等级提升明显。研究结果能够为黄河流域生态综合整治及高质量发展提供科学参考。

关 键 词： 生态系统服务评价；PLUS模型；多情景模拟；黄河流域；陕西段

文章编号： 1000－6060(2024)11－1935－12(1935～1946)

生态系统服务是生态系统形成和维持人类生存发展的环境条件与效用,是人类从生态系统功能中获得的产品和服务[1]。当前社会迅速发展,生态系统提供的人类福祉已不能够满足需求,资源消耗加剧,最终影响、破坏生态系统。所以,减缓人类活动和气候变化对生态系统服务的影响,开展土地利用规划与管制,是实现生态环境保护和高质量发展、推动生态文明建设、增进人类福祉的重要路径[2]。

1982年,“生态系统服务”作为专业术语被正式提出,该领域研究内容、方法、尺度、模拟模型等都逐渐趋于完善,并涌现诸多研究成果[3-4]。从研究内容上看,涉及生态系统服务功能时空分布特征及权衡与协同[5]、供需平衡[6]、价值评估[7]等,尽管国内外生态系统服务研究成果颇丰,但多数仍以跟踪性研究为主,未进一步探讨生态系统服务间的作用关系。由于生态系统服务间交互作用机制复杂,目前研究对生态系统服务交互作用定量化分析不够深入,所以通过探究各生态系统服务的组合和作用强度进行分区,从而根据区域特点精确探讨分区管控方式。从研究方法上看,包括数理统计分析[8-9]、未来多情景模拟[10-11]、驱动因素分析[12-13]等;从研究尺度上看,主要集中于中国东部发达城市[14-15]、城市群及沿海地区[16-17],对黄河流域研究较少,成果不足以支撑黄河流域可持续发展;从模拟模型上看,以往研究视角多基于历史统计数据进行静态评估,而动态评估尤其是对未来多情景精细化预测研

收稿日期： 2023-11-18； **修订日期：** 2024-01-18

基金项目： 陕西省重大科技项目(2022ZDLSF07-05);中央高校基本科研业务费项目(自科)-培育项目(300102352203);国家自然科学基金项目(41971033)资助

作者简介： 张艳(1978-),女,博士,副教授,主要从事土地资源管理、生态安全研究. E-mail: zyzhangyan@chd.edu.cn

通讯作者： 李骏南(1998-),男,硕士研究生,主要从事土地资源管理、生态系统服务研究. E-mail: ln_2302@163.com

究较少[18]，现采用的大部分模型仅能基于过去趋势获得未来土地利用数据，而PLUS模型以斑块级土地利用，精准模拟土地利用背后的非线性关系变化，更加准确地揭示未来不同情景土地利用对生态系统服务功能的潜在影响，且该方法在预测区域生态系统服务中运用较少。

黄河流域陕西段作为黄河流域高质量发展战略重点区域，生态退化严重，全球气候变化和人类无序活动使该地区生态系统服务发生显著变化。在此背景下，本文选择黄河流域陕西段作为研究对象，旨在分析2000—2020年其生态系统服务时空演变特征，识别各生态系统服务优势区域，并利用PLUS模型模拟2035年其自然发展、生态保护、建设优先和可持续发展情景下的综合生态系统服务空间分布格局，叠加优势区分析不同生态系统服务组合和作用强度，最后提出分区管控建议。

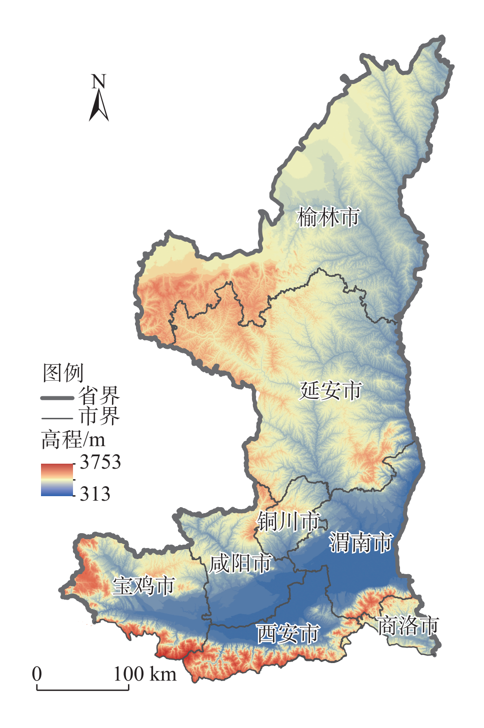


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1 数据与方法

1.1 研究区概况

黄河流域陕西段（106°26′~111°15′E，33°21′~39°35′N）地处陕西中北部，属黄河中游范围，全长719 km，流域面积约13.28×10⁴ km²，地势北高南低，海拔313~3753 m（图1）。研究区气候以温带季风气候为主，四季分明，温度适中，年均温7~14 ℃，年均降雨量340~1240 mm，年均蒸散量448~533 mm。黄河流域陕西段南北跨度较大，支流众多，地质条件复杂，生态类型多样，是陕西省生态保护和经济发展核心区域；矿产资源富集，农业基础较好，区位优势明显，产业体系完备，具有极大的发展潜力。

1.2 数据来源

本文选取的2000、2010、2020年土地利用数据、年度降雨数据、夜间灯光数据、GDP来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn），其中土地利用数据空间分辨率为30 m，其余数据均为1 km分辨率；2000、2010、2020年人口密度数据来源于World Pop（https://www.worldpop.org），空间分辨率为1 km；高程数据来源于中国地理空间数据云（http://www.gscloud.cn），空间分辨率为30 m；植被净初级生产力（NPP）、植被归一化指数（NDVI）及年度蒸散发量数据来源于NASA EarthData官网（https://modis.gsfc.nasa.gov），其中NPP空间分辨率为500 m，其余数据均为1 km分辨率；各市区县粮食产量及人口数量数据均来源于各市的统计年鉴。本文所选成品数据集总体精度为88.95%，可满足研究需要。

1.3 研究方法

本文根据已有成果选择5种生态系统服务构建指标评价体系[19]，包括碳储存、土壤保持、水源供给、粮食生产和居住资源支持，并利用PLUS模型，对2035年自然发展、生态保护、建设优先及可持续发展4种情景下的生态系统服务功能进行预测。

1.3.1 生态系统服务评价体系构建

（1）碳储存

碳储存（CS）指植被通过光合作用封存CO_2的能力。根据已有研究[20]可知生产1 kg干物质可封存1.63 kg的CO_2，其公式为：

$$CS = NPP \times 1.63 \tag{1}$$

$$NPP = APAR \times \varepsilon \tag{2}$$

式中：NPP为植被净初级生产力（$g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$）；APAR为光合活性辐射；$\varepsilon$为光能转化率。

（2）土壤保持

土壤保持（SC）指生态系统能够保持土壤功能的能力。本文采用RUSLE模型[21]计算土壤保持能力，其公式为：

$$SC = A_p - A_r \tag{3}$$

$$A_p = R \times K \times L \times S \tag{4}$$

$$A_r = R \times K \times L \times S \times C \times P \tag{5}$$

式中：SC为土壤保持量(t·hm^{-2}·a^{-1})；A_p为潜在土壤侵蚀量(t·hm^{-2}·a^{-1})；A_r为实际土壤侵蚀量(t·hm^{-2}·a^{-1})；R为降雨侵蚀力指数；K为土壤可蚀性因子；L、S分别为边坡长度和边坡系数；C为植被覆盖与管理因子；P为水土保持措施因子。

(3) 水源供给

水源供给(WY)指一定空间和时间内，该地区将地下径流和地表水保持在系统内的能力。本文采用InVEST模型Water Yield模块水量平衡原理计算产水量[22]，其公式为：

$$Y_x = \left(1 - \frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x \tag{6}$$

$$\frac{\mathrm{AET}_x}{P_x} = \frac{1 + w_x R_x}{1 + w_x R_x + \frac{1}{R_x}} \tag{7}$$

式中：Y_x为栅格x的年产水量(mm)；P_x为栅格x的年降水量(mm)；AET_x为栅格x的年蒸散量(mm)；$\frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}$为Zhang系数；$w_x$为栅格$x$的植被调节系数；$R_x$为栅格$x$的干燥系数。

(4) 粮食生产

粮食生产(CP)指粮食提供能力，一个区县每个像素CP值是NDVI值乘因子，即粮食产量与耕地NDVI总和的比率，其公式为：

$$\mathrm{CP}_{(ij)} = \mathrm{NDVI}_{(ij)} \times \frac{\mathrm{CP}_{(\mathrm{sum},j)}}{\mathrm{NDVI}_{(\mathrm{sum},j)}} \tag{8}$$

式中：$\mathrm{CP}_{(ij)}$为j市区第i个栅格的单位粮食产量(t)；$\mathrm{NDVI}_{(ij)}$为j市区第i个耕地栅格的单位植被覆盖度；$\mathrm{CP}_{(\mathrm{sum},j)}$为$j$市区的总粮食产量(t)；$\mathrm{NDVI}_{(\mathrm{sum},j)}$为$j$市区的耕地植被覆盖度之和。

(5) 居住资源支持

人口、夜间光强等已被证明与人类居住区密切相关，且夜间灯光作为人类活动表征，成为人类活动监测研究良好的数据来源。本文通过统计年鉴获得各市区人口，根据网格夜间光强差异，将其分配到管辖范围内居民网格中，以此表示居住资源支持服务(RS)空间分布特征[23]。

1.3.2 综合生态系统服务评估体系构建

(1) 综合生态系统服务估算

为比较生态系统服务总指标，本文采用“综合生态系统服务”概念，其指标计算需定义权重，确定各生态系统服务重要性。由层次分析法，比较得出碳储存、土壤保持、水源供给、粮食生产和居住资源支持的权重[24]分别为0.1961、0.1715、0.3149、0.1184和0.1991。

(2) 标准化处理

为实现叠加分析，使计算结果具有可比性，本文将生态系统服务阈值范围标准化为0~1，以此表征综合生态系统服务值，其公式为：

$$\mathrm{ES}_i = \frac{E_i - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \tag{9}$$

式中：ES_i为栅格单元i的标准化结果；E_i为栅格单元i的生态系统服务实际值；$E_{\max}$和$E_{\min}$分别为研究区生态系统服务最大值和最小值。

(3) 优势区域划定

优势区域指各生态系统服务起关键作用区域。根据已有研究成果[25]，将标准化结果前30%作为优势区域，并赋值为1，其他区域赋值为0。通过分析各生态系统服务优势区域，可进一步解释其变化趋势。

1.3.3 土地利用及生态系统服务多情景模拟

根据历史土地利用变化趋势及目的设置限制条件，对未来目标年份土地利用情景进行预测。本文利用PLUS模型，预测结果Kappa系数为0.8838，精度满足实际研究。根据研究目的设定自然发展、生态保护、建设优先和可持续发展4种情景(表1)[26-27]，并评估其综合生态系统服务功能。

表1　多情景预测转换规则

Tab. 1　Multi-scenario prediction conversion rules

情景类型	转换规则
自然发展	保持发展趋势，不考虑未来规划，不限制特殊规则，除建设用地和水体均可彼此转换
生态保护	追求高生态效益，限制生态效益高等级用地向低等级转换
建设优先	注重经济发展，将经济效益高用地设为高等级，按照由低到高的转换原则
可持续发展	兼顾经济发展与生态保护，有机结合2种情景需求，耦合人地关系

2 结果与分析

2.1 生态系统服务空间分布格局

生态系统服务空间分布格局如图2所示。碳储存服务呈现“南高北低”的分布特征，因渭北“旱腰带”地区是重要采石区，固碳功能较弱，在榆林及延安北部区域低值聚集，但林地和旱地固碳功能较高，因而在延安中部以南区域碳储存服务值普遍较高。土壤保持受地形和植被覆盖度等综合作用，榆

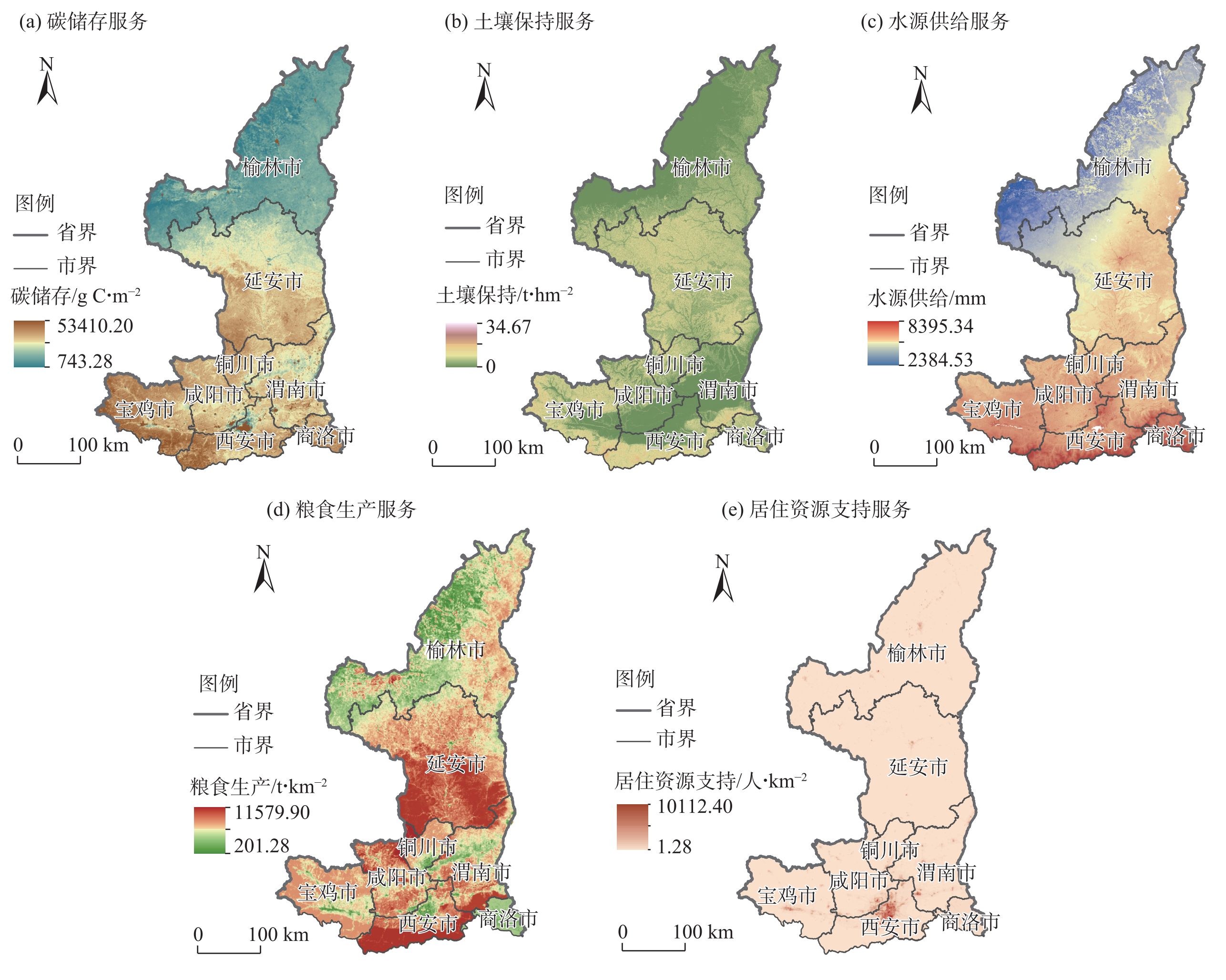


图2 2020年各生态系统服务空间分布格局

Fig. 2 Spatial distribution pattern of each ecosystem service in 2020

林西北部和西安、咸阳、渭南等关中平原地区因坡度小、植被覆盖度低而具有最低土壤保持服务值；秦岭山区森林资源丰富，土壤保持服务值最高。水源供给服务呈现由西北向东南递增的分布特征，秦岭山区林草资源富集、降雨丰沛，水源供给服务最优；受毛乌素沙地影响，榆林西北部未利用地较多，降水资源稀缺，具有最差的水源供给。

粮食生产呈高低交错分布，高值主要分布在延安黄土塬地区，耕作层良好，粮食提供能力较强；秦岭山地生态资源优越，具有较强粮食生产功能；关中平原城市群地形和灌溉条件优越，市区周边高值聚集。居住资源支持服务主要受建成区面积、人口及经济活动影响，关中平原地区较为平坦，适合开发建设，榆林、延安2市受地形条件限制，可供建设用地较少，且分布零散。

生态系统服务时间变化情况如表2所示，2000—2020年除土壤保持外，其他生态系统服务值均保持上升态势，且并未对2020年综合生态系统服务增长造成影响。综合生态系统服务功能在2000—2010年有一定下降，但在2010—2020年有大幅提升，由0.1887增长到0.2461。

表2 2000—2020年各生态系统服务归一化均值

Tab. 2 Normalized mean values of each ecosystem service from 2000 to 2020

年份	碳储存	土壤保持	水源供给	粮食生产	居住资源支持	综合生态系统服务
2000	0.0782	0.0213	0.3642	0.3535	0.0046	0.2205
2010	0.1127	0.0179	0.3420	0.4496	0.0085	0.1887
2020	0.1260	0.0103	0.4765	0.3644	0.0134	0.2461

各生态系统服务优势区域分布如图3所示，整体上看，碳储存、水源供给及居住资源支持服务南北分化明显；土壤保持和粮食生产服务呈现交错分布特征。具体而言，碳储存服务以延安中部为界，南部为优势区域，北部为其他区域；土壤保持服务

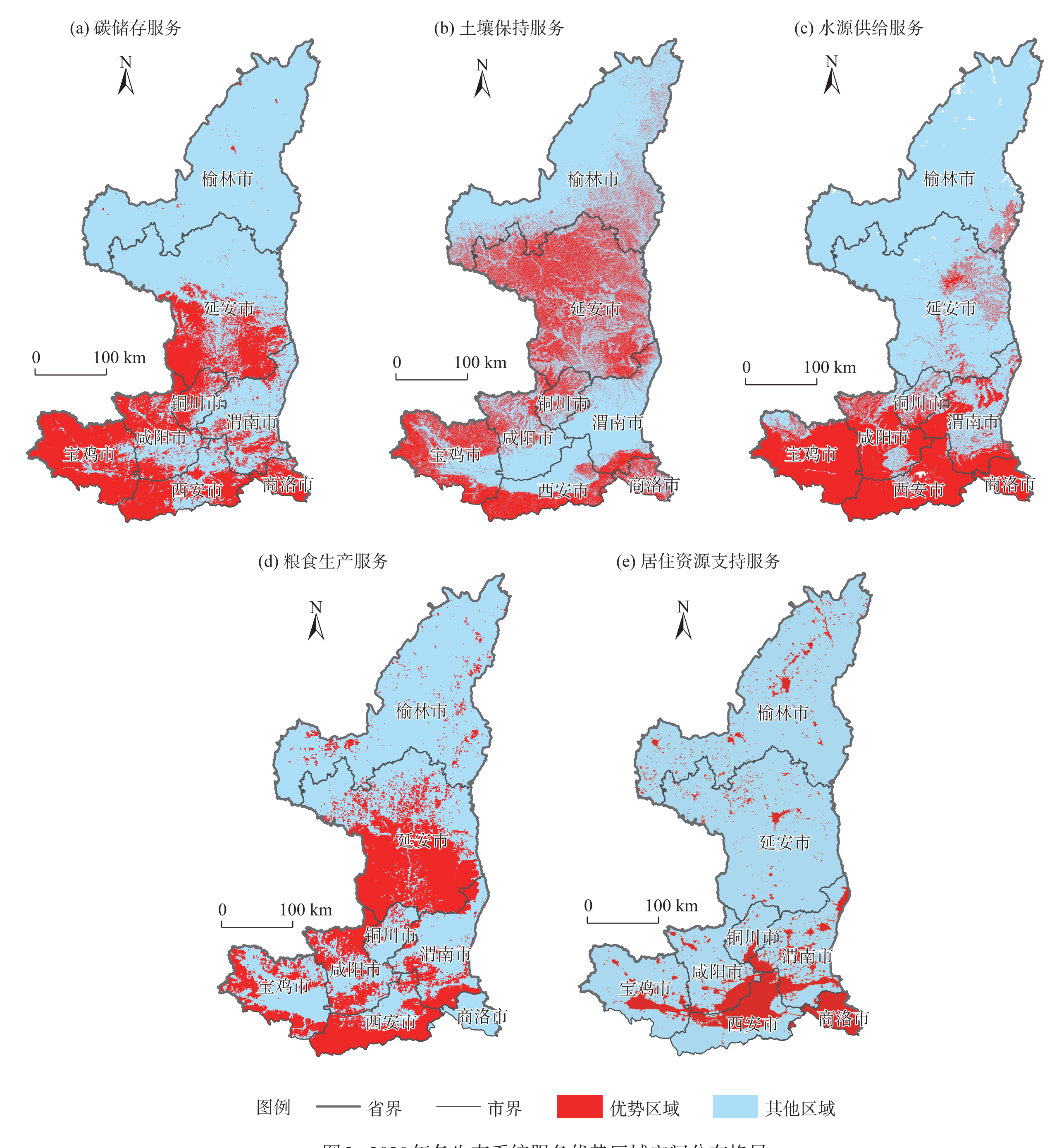


图3　2020年各生态系统服务优势区域空间分布格局

Fig. 3　Spatial distribution pattern of each ecosystem service advantage region in 2020

优势区域以延安为主，另外秦岭山地也有部分优势区域；水源供给服务优势区域聚集在关中平原4市，陕北2市为其他区域；粮食生产优势区域分布情况与土壤保持较为接近；居住资源支持服务优势区域主要在城市建成区，其中西安最为明显。

2.2　综合生态系统服务时空分布特征

2000—2020年综合生态系统服务整体提升明显，其空间分布特征为"南高北低"（图4）。最低值主要分布在榆林西北部，该地区深处毛乌素沙漠腹地，经多年大规模开展治沙造林运动，20 a间已取得明显成效，综合生态系统服务得到提升；渭北"旱腰带"地区因矿石开采强度较大，也具有低值综合生态系统服务；秦岭山地自然资源丰富、生态环境良好，研究时段内综合生态系统服务始终保持较高水平。

2.3　基于PLUS模型的多情景模拟预测

2.3.1　土地利用多情景模拟　对2035年土地利用自然发展、生态保护、建设优先和可持续发展情景

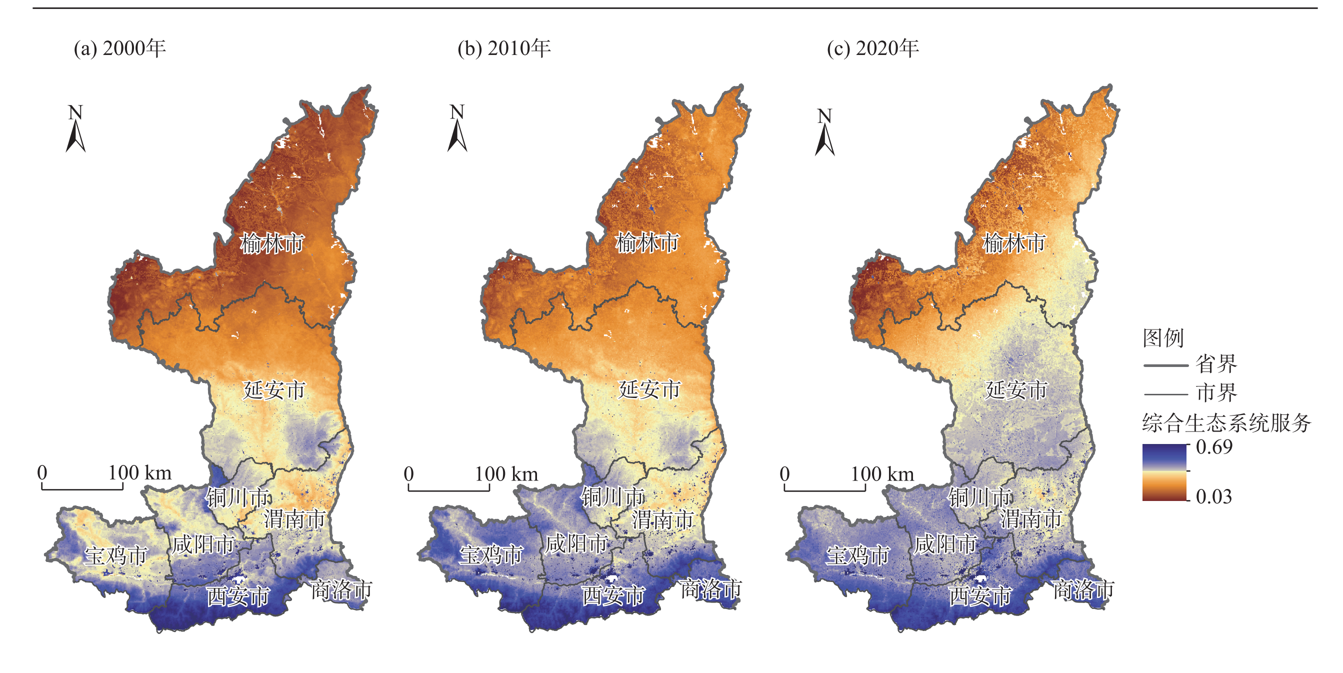


图4 2000—2020年综合生态系统服务空间分布格局

Fig. 4 Spatial distribution patterns of integrated ecosystem services from 2000 to 2020

进行预测。自然发展情景下林地面积增加、草地面积减少,建设用地面积占比仅上升0.01%;生态保护情景下林地面积增加明显,建设用地面积减少150 km²,意味着更注重盘活存量及减量发展;建设优先情景表现为更激进的开发模式,较2020年建设用地面积占比提升0.57%;可持续发展情景下林地和建设用地均明显上升,其面积占比分别提升0.91%和0.57%,但耕地和草地降幅明显,其面积占比分别下降0.92%和0.56%(表3)。

如图5所示,相较于2020年,自然发展情景保持以往发展趋势,体现为耕地、未利用地转换为建设用地,林草地间相互转换,变化热点以城市建成区为主;生态保护情景则严格限制城市空间向外拓展,注重向内提升,着重增加生态用地面积,表现为研究区中南部林草地面积增加;建设优先情景发展模式最激进,建设用地显著扩张,以西安为中心呈放射状推进带动作用;可持续发展情景注重平衡开发与保护,建设用地面积显著增加,同时生态用地面积占比提升。整体上各情景变化热点区域主要分布在西安、咸阳等关中平原城市地区,陕北2市变化热点相对较少,主要在城市建成区周边。

2.3.2 综合生态系统服务多情景模拟 利用自然断点法将综合生态系统服务等级划分成低、较低、中等、较高、高5级,对2035年4种情景下的综合生态系统服务进行模拟预测,得到模拟结果如图6所示,各级所占面积及占比如表4所示。相比于2020年现状,4种模拟情景表现出不同变化趋势且均表现为南高北低。其中,自然发展情景综合生态系统服务表现为中等等级面积减少,高、低等级面积占比有一定提升;生态保护情景高等级面积占比提升显

表3 2020年与2035年多情景土地利用面积动态变化

Tab. 3 Dynamic changes of land use area under multiple scenarios in 2020 and 2035

土地利用类型	2020年		2035年							
	基准情景		自然发展情景		生态保护情景		建设优先情景		可持续发展情景	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
耕地	49501	37.29	49501	37.29	48850	36.80	48713	36.69	48288	36.37
林地	23137	17.43	23823	17.94	24135	18.18	23137	17.43	24352	18.34
草地	49246	37.09	48602	36.61	49111	36.99	49246	37.10	48501	36.53
水域	1434	1.08	1401	1.05	1427	1.07	1434	1.08	1377	1.04
建设用地	5098	3.84	5106	3.85	4948	3.73	5859	4.41	5854	4.41
未利用地	4344	3.27	4327	3.26	4289	3.23	4371	3.29	4388	3.31

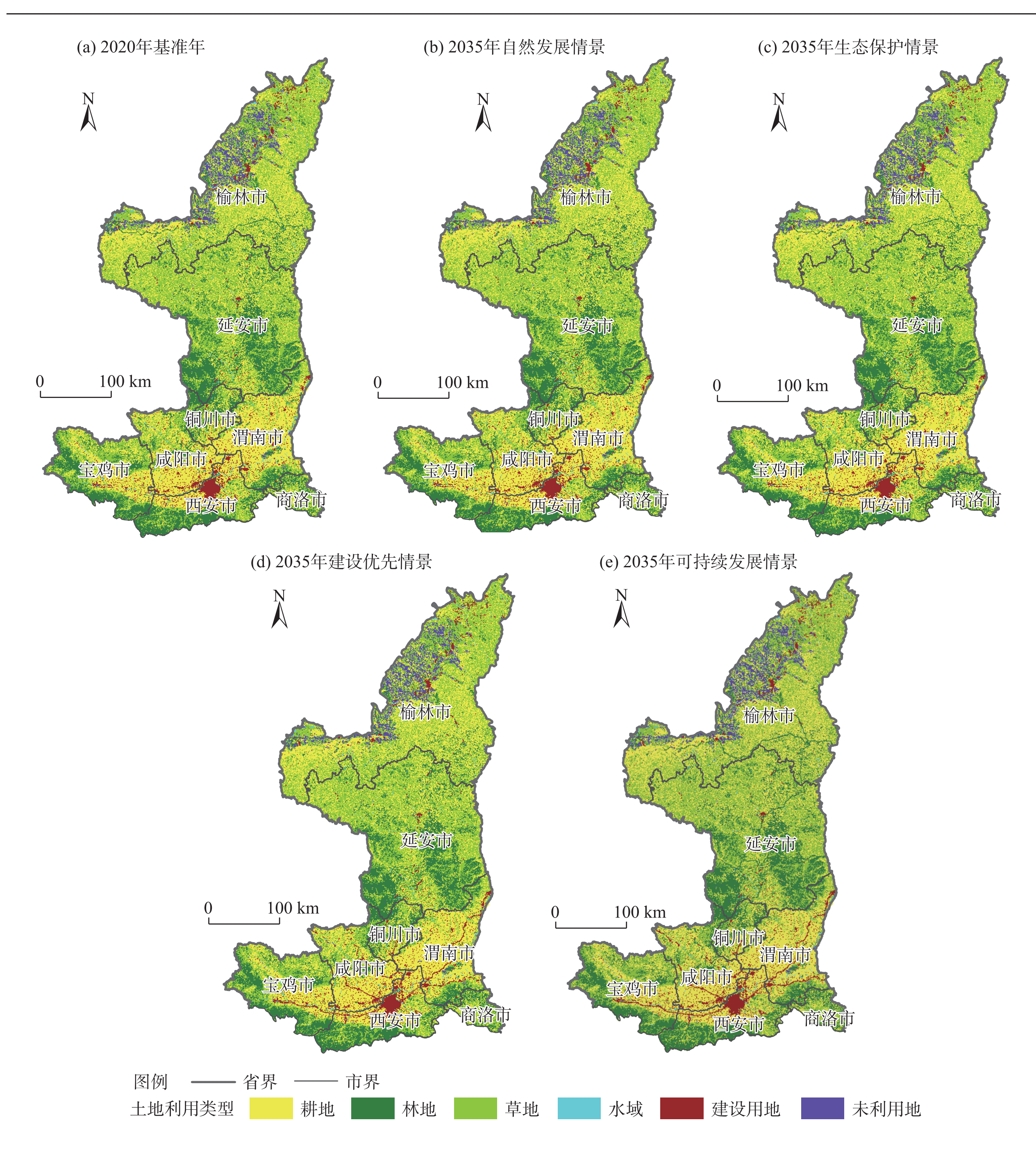


图5　2035年土地利用变化多情景模拟结果

Fig. 5　Multi-scenario simulation results of land use change in 2035

著，中等等级面积下降明显；建设优先情景高等级面积变化不大，主要体现在中等等级向较低和低等级转换；可持续发展情景与生态保护情景变化趋势相同，但高等级面积占比增幅低于后者。

将自然发展情景与其他3种情景相叠加，可得自然发展模式与不同管控措施的2035年综合生态系统服务变化热点区域(图7)。得出相较于自然发展情景，生态保护情景下综合生态系统服务等级提升区域主要在榆林西北部生态脆弱区、延安中南部生态综合整治区及西安主城区周围；建设优先情景下沿黄水系等级降低区域聚集，仅有宝鸡和咸阳部分区域及零散分布地区等级提升；可持续发展情景下延安中北部及榆林大部分地区等级提升区域聚集明显，关中平原地区仅有宝鸡和咸阳2市存在等级提升区域。综合来看，陕北地区在生态保护和可持续发展情景下综合生态系统服务发展优于建设优先情景，这与其发展模式及依赖能源开采有关；关中平原地区城市需注重可持续发展，转变经济增

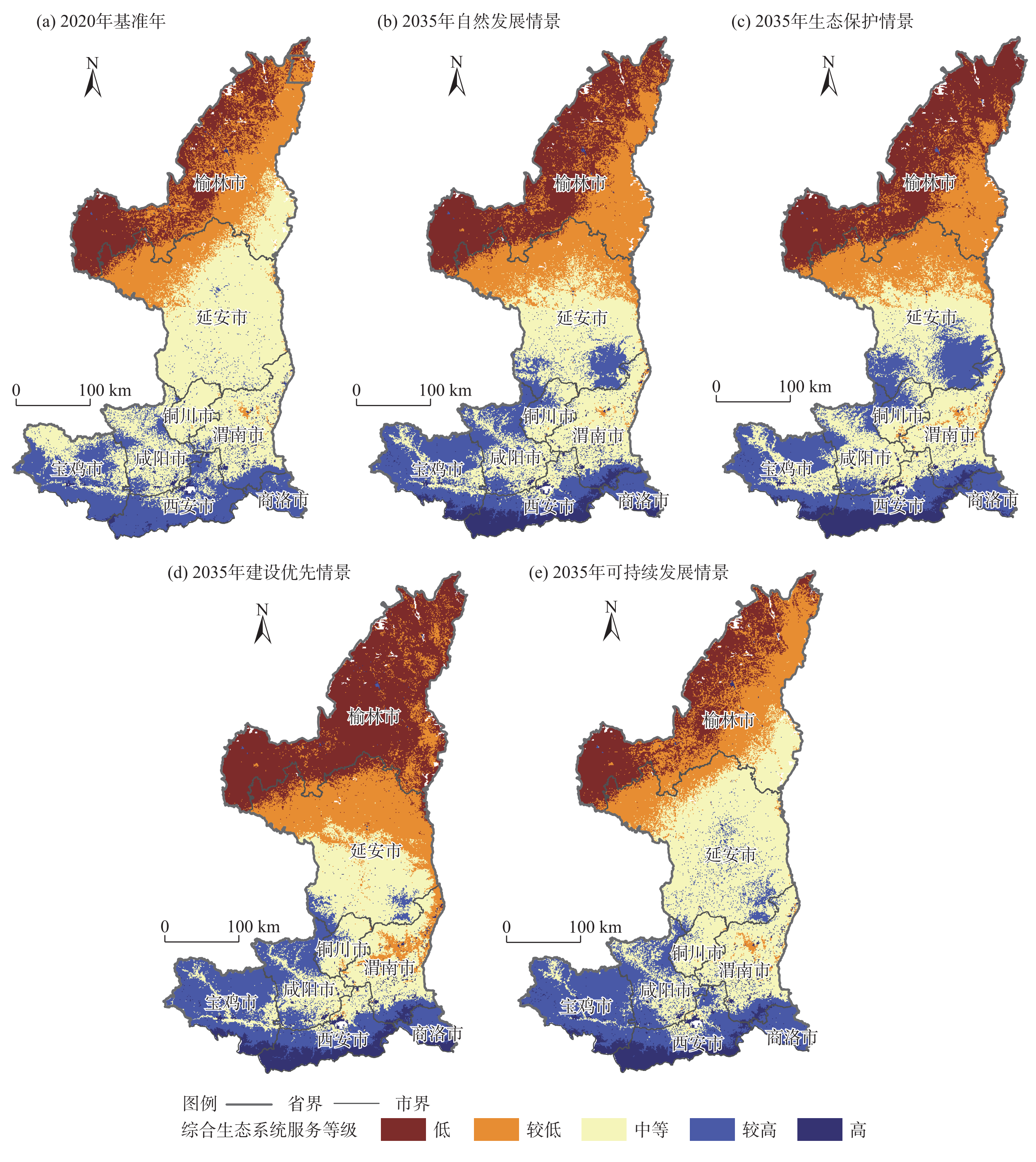


图6 2035年综合生态系统服务多情景模拟结果

Fig. 6 Multi-scenario simulation results of integrated ecosystem services in 2035

表4 2020年与2035年多情景综合生态系统服务各等级面积动态变化

Tab. 4 Dynamic changes in the area of multi-scenario integrated ecosystem services at different levels in 2020 and 2035

综合生态系统服务等级	2020年		2035年							
	基准情景		自然发展情景		生态保护情景		建设优先情景		可持续发展情景	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
高	20784	15.66	27922	21.03	40555	30.55	19790	14.91	29985	22.59
较高	27362	20.61	29566	22.27	25138	18.93	25639	19.31	27979	21.07
中等	58710	44.22	40072	30.18	34420	25.93	52518	39.56	39082	29.44
较低	23957	18.05	27679	20.85	25388	19.12	28527	21.49	28691	21.61
低	1947	1.47	7521	5.67	7259	5.47	6286	4.73	7023	5.29

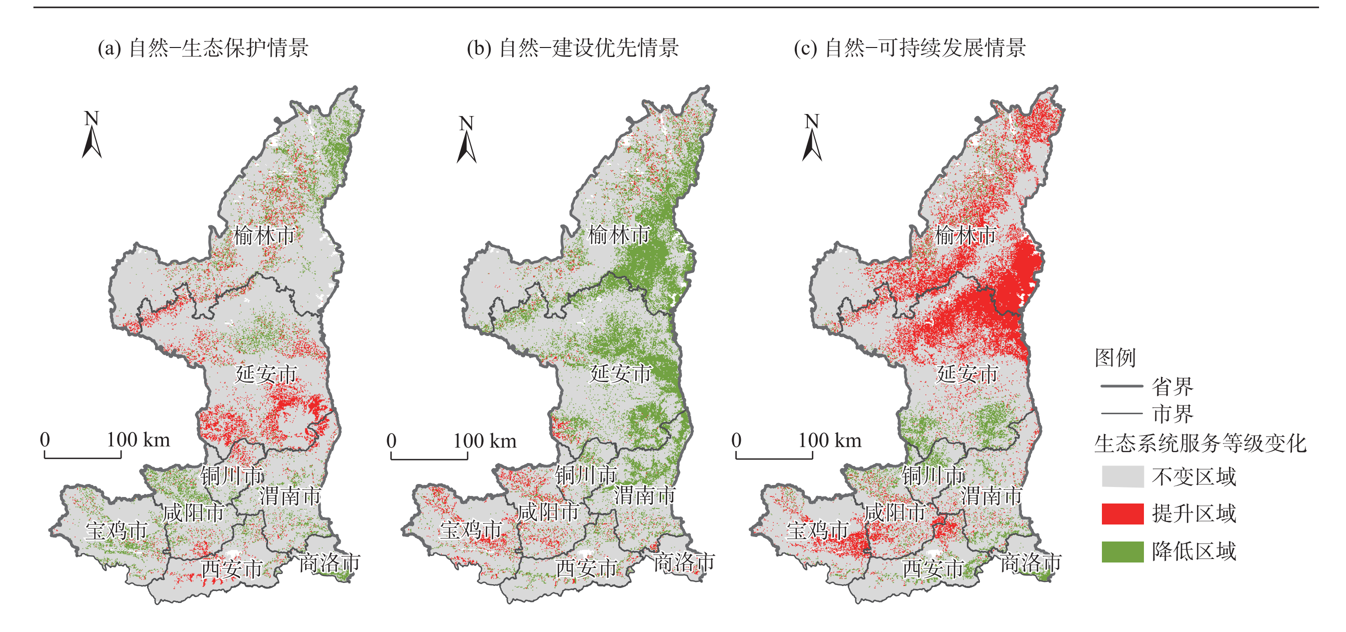


图7　2035年综合生态系统服务多情景模拟变化热点区域

Fig. 7　Change hotspots in multi scenario simulation of integrated ecosystem services in 2035

长模式，探索高质量发展。

2.4　分区与管控建议

通过叠加各生态系统服务优势区域和预测生态系统服务评价结果，将研究区按属性划分为7类区域（图8）。针对区域优势最大化和因地制宜问题，提出相应防范措施。

生态稳定区生态系统调节服务功能较高，应加强植被保护，保持生态稳定；生态恢复区植被覆盖度和土壤保持性较高，固碳量较生态稳定区低，应选择储水能力强、固碳能力强的树种进行造林；郊区发展区分布在关中平原西部，有利于提供充足食物和生活空间，应进行农业集约化，避免发展大型重工业；城市群区作为人类活动集中区，主要承担社会经济功能，应合理规划城市发展，优化城市人口结构，提高城市内部生态安全；农业优势区具有良好的水源供给和粮食生产服务，利于作物种植，但生产能力较郊区发展区弱，需开发高标准农田；受环境制约，农业发展区仅以粮食生产服务为主，可发展农产品加工；北部生态养殖区环境条件较差，许多地区不具备有利的生态系统服务功能，林地质量和水土保持能力有待提高。

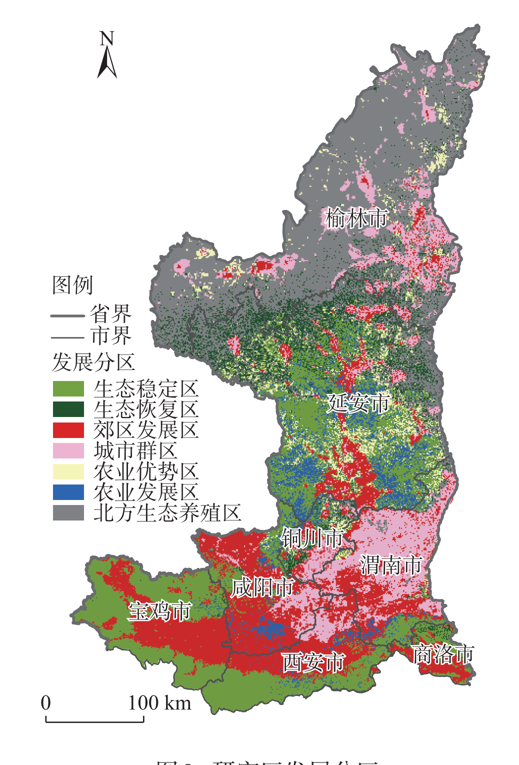


图8　研究区发展分区

Fig. 8　Development zoning of study area

3　讨 论

在各生态系统服务功能中，居住资源支持呈现出增长趋势，且增幅明显。但在Peng等[23]、Zhang等[25]相关成果中指出，因城市生态系统具有脆弱性，高度依赖外部物质流入来维持稳定，以其为主导的景观被压抑，一旦外部供给不足，生态系统就会崩溃。随着城市快速发展，对外部土地和物质需求不断增加，给周边地区带来压力，降低了生态系统服务水平和多样性，也间接导致2010—2020年土壤保持服务功能显著下降，这与方露露等[28]关于

2000—2016年黄河流域产水服务和土保持服务研究结论中变化趋势相同。水源供给服务在研究期内总体呈下降趋势且波动明显，这与杨洁等[29]关于1995—2015年黄河流域产水服务研究和童瑞等[30]黄河流域1961—2012年蒸散发时空变化特征分析结果相似。因此，应以土壤保持和水资源供给升级保护[30]为生态系统正常运行提供保障，生态环境治理主导的土壤保持与碳固存改善对黄河流域保护至关重要。整体上研究区综合生态系统服务功能持续向好，这与朱春霞等[31]的黄河流域生态系统服务时空演变结论相似。

通过叠加预测目标年生态系统服务优势区分析不同生态系统服务组合和作用强度，基于此提出分区结果对黄河流域（陕西段）生态系统服务提供更全面的认识。阐明景观生态风险对生态系统服务或生态过程影响及效益是一项有意义的探索，拓展了景观生态风险的生态学内涵。此外，基于研究区生态系统现状，可以做出以生态系统服务空间供给与需求适配为重点的协同社会生态发展决策，促进黄河流域可持续发展。

4 结 论

（1）2000—2020年黄河流域陕西段除土壤保持服务值呈现出一定降幅外，其他各生态系统服务值均保持上升态势；综合生态系统服务值在2000—2010年下降明显，但在2010—2020年有大幅提高，因而在研究时段内整体提升显著。

（2）2000—2020年研究区内各生态系统服务分布具有明显空间分异性。碳储存服务分布呈现“南高北低”特征；坡度小、植被覆盖度低地区具有最低的土壤保持服务值，森林资源丰富的区域土壤保持服务值最高；水源供给服务值在秦岭山区最高，并逐渐由东南向西北递减；黄土塬地势平坦、侵蚀较微弱，是良好的耕作区，具有较高粮食生产服务值；居住资源支持主要分布在关中平原城市群。

（3）2035年土地利用模拟结果显示，自然发展情景下保持原有发展趋势，建设用地面积有序增长；生态保护情景下林地面积占比显著提升，建设用地面积出现下降现象；建设优先情景则表现为建设用地面积大幅提升，主要来源为耕地和林地；可持续发展情景下林地和建设用地面积均有一定上涨，发展较为均衡。

（4）相比于自然发展情景，生态保护情景在研究区中部和西北部有一定等级提升区域；建设优先情景仅在宝鸡、咸阳2市有提升，沿黄水系等级降低区域聚集明显；可持续发展情景在研究区北部提升明显，关中平原地区则表现为“西南热东北冷”。

（5）城市快速发展使居住资源支持增幅明显，外部土地和物质需求不断增加，间接导致2000—2020年土壤保持服务显著下降，因此应加强土壤保持服务等生态调节功能，提高土壤保持和碳固存能力，为生态系统正常运行提供保障。将研究区域划分为7类区域，针对区域优势最大化和因地制宜问题，提出相应防范措施，以此为黄河流域（陕西段）生态系统服务研究提供新角度，促进可持续发展。

参考文献（References）

[1] Tallis H, Kareiva P, Marvier M, et al. An ecosystem services framework to support both practical conservation and economic development[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(28): 9457-9464.

[2] Ehrlich P R, Mooney H A. Extinction, substitution, and ecosystem services[J]. Bioscience, 1983, 33(4): 248-254.

[3] Tallis H, Polasky S. Mapping and valuing ecosystem services as an approach for conservation and natural-resource management[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2009, 1162(1): 265-283.

[4] Martinez-Harms M J, Bryan B A, Figueroa E, et al. Scenarios for land use and ecosystem services under global change[J]. Ecosystem Services, 2017, 25: 56-68.

[5] 路昌, 蔡雪芹, 郝灿书, 等. 黄河三角洲高效生态经济区生态系统服务权衡协同关系[J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 457-468. [Lu Chang, Cai Xueqin, Hao Canshu, et al. Ecosystem service tradeoff and synergistic relationship in the Yellow River Delta High-Efficiency Eco-Economic Zone[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2): 457-468.]

[6] 陈立恒, 龚健, 王雄, 等. 长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5546-5556. [Chen Liheng, Gong Jian, Wang Xiong, et al. Spatial relationship between ecosystem services balance and urbanization in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5546-5556.]

[7] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9459-9470. [Chen Meijing, Wang Qingri, Bai Zhongke, et al. Land use transition of resource-based cities in the Yellow River Basin and its impact on ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9459-9470.]

[8] Schmidt K, Walz A, Jones I, et al. The sociocultural value of upland regions in the vicinity of cities in comparison with urban

green spaces[J]. Mountain Research and Development, 2016, 36(4): 465-474.

[9] Xu X B, Jiang B, Tan Y, et al. Lake-wetland ecosystem services modeling and valuation: Progress, gaps and future directions[J]. Ecosystem Services, 2018, 33: 19-28.

[10] Li N, Zhao Y L, Feng C C, et al. Regional ecological risk assessment based on multi-scenario simulation of land use changes and ecosystem service values in Inner Mongolia, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 155: 111013, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111013.

[11] 李何英, 何文, 王金叶, 等. 基于PLSR-FLUS-MarKov模型的生态系统服务价值多情景预测——以漓江流域为例[J/OL]. 水生态学杂志. [2024-03-22]. https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202211210468. [Li Heying, He Wen, Wang Jinye, et al. Multi-scenario prediction of ecosystem service value based on PLSR-FLUS model: A case study of Lijiang River Basin[J/OL]. Journal of Hydroecology. [2024-03-22]. https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202211210468.]

[12] 刘颂, 张浩鹏, 裴新生, 等. 长时间序列生态系统服务权衡与协同驱动因素研究——以芜湖市生态系统服务功能极重要区为例[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 1780-1790. [Liu Song, Zhang Haopeng, Pei Xinsheng, et al. Drivers of ecosystem service trade-off and synergy in long-term sequence: A case study of the extremely important ecosystem service function area in Wuhu City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1780-1790.]

[13] 马伟波, 杨帆, 王楠, 等. 长三角城市群地区生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1365-1376. [Ma Weibo, Yang Fan, Wang Nan, et al. Study on spatial-temporal evolution and driving factors of ecosystem service value in the Yangtze River Delta urban agglomerations[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(11): 1365-1376.]

[14] 赵霁雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究——以湛江市中心城区为例[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320. [Zhao Jiyu, Cui Liu, Wang Jia, et al. Multi-scenario simulation of urban green space development and construction timeline based on PLUS model analysis: A case study of the central Zhanjiang City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6307-6320.]

[15] 陈德权, 兰泽英, 张郁, 等. 广州市水源涵养生态系统服务功能评价与影响因素研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(2): 34-38. [Chen Dequan, Lan Zeying, Zhang Yu, et al. Evaluation and influence mechanism of water conservation ecosystem service function in Guangzhou City[J]. Geospatial Information, 2024, 22(2): 34-38.]

[16] 席梅竹, 赵中秋, 赵颖丽. 基于PLUS模型的2030年滹沱河流域山区段生态承载力时空格局多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(3): 518-529. [Xi Meizhu, Zhao Zhongqiu, Zhao Yingli. Multi-scenario prediction of the spatial and temporal patterns of ecological carrying capacity in the mountain section of Hutuo River Basin in 2030 based on the PLUS model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(3): 518-529.]

[17] 张天海, 田野, 徐舒, 等. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(21): 7572-7581. [Zhang Tianhai, Tian Ye, Xu Shu, et al. The evolvement of land use patterns in coastal cities and its influence on ecosystem service values[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): 7572-7581.]

[18] 赵恒谦, 刘骞, 杨姿涵, 等. 2000—2020年辽宁省生态系统服务评估与多情景预测[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4137-4151. [Zhao Hengqian, Liu Qian, Yang Zihan, et al. Ecosystem services assessment and multi-scenario prediction in Liaoning Province from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4137-4151.]

[19] 李祖政. 北京市生态系统服务对气候和土地利用的响应及情景模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. [Li Zuzheng. Response of ecosystem service to climate and land use and scenario simulation in Beijing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]

[20] 殷允可, 李昊瑞, 张铭, 等. 不同气候区生态系统服务权衡空间异质性及其驱动因素——以川滇-黄土高原生态屏障带为例[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 107-116. [Yin Yunke, Li Haorui, Zhang Ming, et al. Spatial heterogeneity of ecosystem service trade-offs in different climatic regions and its driving factors: A case study of the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau ecological barrier zone[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 107-116.]

[21] 李敏, 张艳. 黄河流域中段植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(1): 10-20, 40. [Li Min, Zhang Yan. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of vegetation cover in the middle Yellow River Basin[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences Edition), 2023, 41(1): 10-20, 40.]

[22] 贾雯霞, 张艳, 崔国屹. 汾河流域生态系统服务供需匹配关系研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(2): 15-23. [Jia Wenxia, Zhang Yan, Cui Guoyi. Research on the matching relationship between supply and demand of ecosystem services in the Fenhe River Basin[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences Edition), 2023, 41(2): 15-23.]

[23] Peng J, Hu X X, Qiu S J, et al. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 765-775.

[24] 徐苏, 方勇, 谢超, 等. 基于层次分析法的城市防洪风险综合评价研究[J]. 吉林水利, 2024(1): 71-75. [Xu Su, Fang Yong, Xie Chao, et al. Research on comprehensive evaluation of urban flood control risk based on analytic hierarchy process[J]. Jilin Water Resources, 2024(1): 71-75.]

[25] Zhang D H, Jing P Q, Sun P J, et al. The non-significant correlation between landscape ecological risk and ecosystem services in Xi' an metropolitan area, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109118, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109118.

[26] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions

[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125-1136.]

[27] 隋露, 蒲春玲, 刘志有, 等. 基于PLUS模型的乌鲁木齐市生态服务价值权衡协同探究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 159-168. [Sui Lu, Pu Chunling, Liu Zhiyou, et al. Trade-off synergy of ecosystem service value in Urumqi City based on PLUS model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 159-168.]

[28] 方露露, 许德华, 王伦澈, 等. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838. [Fang Lulu, Xu Dehua, Wang Lunche, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River Basin and Yellow River Basin[J]. Geographical Research, 2021, 40(3): 821-838.]

[29] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739. [Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2731-2739.]

[30] 童瑞, 杨肖丽, 任立良, 等. 黄河流域1961—2012年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 16-21. [Tong Rui, Yang Xiaoli, Ren Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961—2012 and analysis of its influence factors[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 16-21.]

[31] 朱春霞, 钟绍卓, 龙宇, 等. 黄河流域生态系统服务的时空演变及其驱动力[J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2502-2513. [Zhu Chunxia, Zhong Shaozhuo, Long Yu, et al. Spatiotemporal variation of ecosystem services and their drivers in the Yellow River Basin, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2502-2513.]

Evaluation and multi-scenario prediction of ecosystem services in the Yellow River Basin based on PLUS model: A case of Shaanxi section

ZHANG Yan[1,2], LI Junnan[1], PAN Bohua[3]

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Land Improvement, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Changchun Urban Planning & Research Center, Changchun 130022, Jilin, China)

Abstract: The long-term supply and optimization of ecosystem services are critical for sustainable social development, necessitating a precise understanding of ecosystem service trends. This study integrates multi-source data, employing the InVEST model and an ecosystem service evaluation framework to analyze these trends. A comprehensive assessment of the spatiotemporal evolution of ecosystem services in the Shaanxi section of the Yellow River Basin, China, was conducted from 2000 to 2020. The PLUS model was subsequently used to simulate and forecast land use and ecosystem service changes for 2035. The findings reveal that: (1) From 2000 to 2020, the spatial distribution of comprehensive ecosystem service values in the Shaanxi section exhibited a "high in the south and low in the north" pattern, with high-value areas predominantly located in the southern region. (2) From 2000 to 2020, the comprehensive ecosystem service value initially declined and then increased significantly, with high-value areas expanding from south to north. Apart from soil conservation services, the values of other ecosystem services improved to varying extents, displaying significant spatial differentiation. (3) Under the ecological protection scenario, forest area notably increased, and service levels in the central and northern regions improved markedly. Conversely, in the construction priority scenario, the expansion of construction land led to decreased service levels in the Yellow River system and pronounced clustering of affected areas. In the sustainable development scenario, both forest and construction land expanded, significantly enhancing service levels in the northern part of the study area. Based on these results, this study examines the impacts of regional social development on ecosystem services and offers zoning and control recommendations, providing valuable insights for the high-quality development of the Yellow River Basin.

Key words: evaluation of ecosystem services; PLUS model; multi-scenario simulation; Yellow River Basin; Shaanxi section